

面向复杂障碍场的电力巡检机器人 局部动态融合路径规划

宁雪峰^{1,2}, 袁炜灯¹

(1. 广东电网有限责任公司 东莞供电局, 广东 东莞 523000;

2. 华南理工大学 电力学院, 广州 510000)

摘要: 为解决电力巡检机器人在复杂障碍场中, 常与障碍物碰撞、避障效率低等问题, 提出面向复杂障碍场的电力巡检机器人局部动态融合路径规划方法; 使用基于栅格法的复杂障碍场地图生成方法, 构建面向复杂障碍场的电力巡检环境地图; 结合所构建地图信息, 由改进遗传算法寻优获取巡检所用全局最短路径后, 经时间弹性带算法, 结合不同时刻机器人位姿信息, 由距离阈值判断机器人与动态障碍物碰撞可能性, 以全局规划路径弹性拉伸的方式, 完成局部动态融合的避障运行, 且需分析局部动态规划路径中, 机器人运行方向与全局规划路径一致性, 动态调节规划机器人巡检路径; 经测试, 此方法使用后, 机器人未出现碰撞问题, 且避障速度提升约 300%。

关键词: 复杂障碍场; 电力巡检; 机器人; 局部动态; 融合路径规划; 栅格法

Local Dynamic Fusion Path Planning for Power Inspection Robots Facing Complex Obstacle Fields

NING Xuefeng^{1,2}, YUAN Weideng¹

(1. Guangdong Power Grid Corp. Dongguan Power Supply Bureau, Dongguan 523000, China;

2. Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510000, China)

Abstract: To solve the problems of frequent collision with obstacles and low obstacle avoidance efficiency of power inspection robots in complex obstacle fields, a local dynamic fusion path planning method for power inspection robots in complex obstacle fields is proposed. a grid based method for generating complex obstacle field maps is used to construct a power inspection environment map for complex obstacle fields; Combined with the constructed map information, After obtaining the global shortest path for inspection by an improved genetic algorithm and combining with the robot pose information at different times by the time elastic band algorithm, the possibility of collision between the robot and dynamic obstacles is determined by the distance threshold value, and the obstacle avoidance operation of local dynamic fusion is completed through the elastic stretching of the global planning path; In addition, it is necessary to analyze the consistency between robot running direction and global planning path in the local dynamic programming path, and dynamically adjust and plan the robot patrol path. After testing this method, there are not any collision of the robot, and the obstacle avoidance speed is increased by about 300%.

Keywords: complex obstacle field; electric power inspection; robot; local dynamics; integration path planning; grid method

0 引言

目前我国变电站的发展方向以无人式管理为主, 巡检机器人出现后, 解决了以往人工巡检效率低这一弊端^[1]。电力设备巡检时, 机器人属于巡检所用智能体, 可使用全自动或远程控制的方式完成电力巡检任务。当下我国很多企业都将无轨化导航技术, 使用在机器人巡检控制问题中, 但此类技术均以优化巡检信息采集精度、常规性巡检路径规划效果为主, 未考虑机器人在复杂障碍场中路径规划效果^[2]。复杂障碍场中, 除了固定已知障碍物, 还会出现动态

移动、新增的障碍物, 此类障碍物的出现模式并不存在规律, 此问题对电力巡检机器人运行安全存在直接威胁^[3-4]。

刘胜等人曾将 ACO-SA 算法, 用于变电站巡检机器人路径规划问题中, 此算法可由改进的蚁群一模拟退火算法, 完成机器人路径全局规划, 但在复杂障碍场中避障效果还有待测试^[5]; 童泉军等人在规划表计读数巡检机器人巡检路径时, 构建可优化巡检效率的路径规划目标函数, 并由蚁群优化算法寻优获取路径规划方案, 完成巡检机器人路径优化设计。但此方法路径规划仅适用于环境已知的工况

收稿日期: 2023-05-11; 修回日期: 2023-05-30。

基金项目: 南方电网公司科技项目(031900KK52220003)。

作者简介: 宁雪峰(1982-), 男, 硕士, 高级工程师。

袁炜灯(1982-), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 宁雪峰, 袁炜灯. 面向复杂障碍场的电力巡检机器人局部动态融合路径规划[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(11): 101-105, 158.

之中,针对动态、突然出现的障碍物而言,此方法是否具备路径动态规划能力,还有待分析^[6]。邱硕涵等人通过使用 DStar 算法来规划机器人的最优路径,考虑到机器人在执行任务时可能会遇到障碍物或工作空间的干扰,因此在规划路径时充分考虑了避免碰撞的策略,从而降低了潜在的碰撞风险和安全隐患,保障了机器人执行任务的安全性^[7]。郑亚红等人提出利用自适应蒙特卡洛定位算法解决传统蒙特卡洛算法中机器人绑架和粒子数固定问题,能够实时定位巡检机器人的位置,并结合异常温度检测与报警算法,及时发现并报警温度异常情况。与传统蒙特卡洛算法相比,它能够根据机器人实时的运动状态,动态地调整粒子数的数量,减少了机器人绑架和定位不准确的问题,提高了巡检效率和精准度,同时也保障了机器人行动的安全性^[8]。张志文等人采用了融合改进 A* 算法和动态窗口法的全局动态路径规划方法。这种方法首先基于传统 A* 算法,结合 JPS 算法对子节点进行扩展跳跃,从而提高了路径规划效率;其次,采用 Floyd 算法对规划的路径进行平滑优化,使得路径更加平滑,减少了路径的曲折度;最后,融合动态窗口法,使得 A* 算法能够进行全局动态路径规划^[9]。但上述方法的路径规划效率及机器人运动效率不够理想,还需要获得更加智能化和高效的路径规划解决方案。

为此,本文研究面向复杂障碍场的电力巡检机器人局部动态融合路径规划方法。此方法结合复杂障碍场环境的特殊性,采用基于栅格法的复杂障碍场地图生成方法,构建面向复杂障碍场的电力巡检环境地图。结合所构建地图信息,采用基于局部动态融合的电力巡检机器人路径规划方法,通过改进遗传算法寻优获取最短路径并结合时间弹性带算法,在不同时刻根据机器人位姿信息,判断机器人与动态障碍物碰撞可能性,并通过弹性拉伸方式完成局部动态融合的避障运行。同时,还需要对局部动态规划路径中机器人运行方向与全局规划路径的一致性进行分析和动态调节规划机器人巡检路径,以确保其路径规划的准确性和高效性。

1 电力巡检机器人局部动态融合路径规划方法

障碍物群体因运行方式不同,且存在未知性,为此可将其看做复杂障碍场。面向复杂障碍场的电力巡检环境中可能存在多种形状的障碍物,如墙壁、陡坡、河流等。这些障碍物不仅影响了机器人的行进速度,还可能引起机器人的碰撞和损坏。且巡检环境可能包含多个场景,例如室内外、高空等,不同场景的特点和巡检难度都不一样。需要针对不同场景做出相应的适配和规划。并且环境中障碍物和巡检目标的位置随时间和空间的变化而改变,机器人需要实时感知环境并调整路径规划。为简略说明巡检过程,将电力巡检机器人所巡检环境,近似成二维平面,则电力巡检机器人在巡检环境中,躲避多种障碍物问题,便可看成二维空间中穿越复杂障碍场问题。设置电力巡检机器人在出发点至巡检目标点时,途中会出现已知、未知障碍物

群体,此类障碍物群体又分为静态、动态障碍物,详情如图 1 所示。障碍物之间可能存在一定距离,可以作为电力巡检机器人可通行路径。

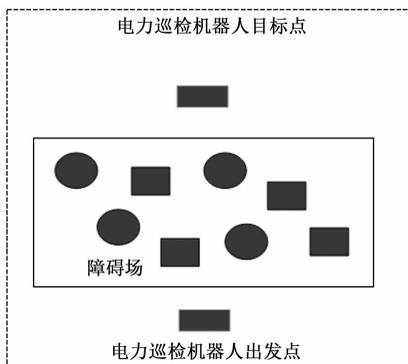


图 1 面向复杂障碍场的巡检环境分析

为此,在此巡检环境中,想要保证电力巡检机器人安全运行至目标点,必须动态规划机器人的运行路径,在动态避障的前提下,才能安全抵达目标点^[10]。为此,本文研究面向复杂障碍场的电力巡检机器人局部动态融合路径规划方法,此方法的核心方法主要分为复杂障碍场地图生成、全局路径规划、局部动态路径规划、巡检路径动态融合规划 4 种。

1.1 基于栅格法的复杂障碍场地图生成方法

复杂障碍场地图是指存在着多个不规则形状的障碍物,如建筑物、道路障碍等,这些障碍物对于机器人的路径规划具有很大的影响。因此,将复杂障碍场中电力巡检机器人巡检环境进行地图建模,可以有效解决路径规划的问题。

栅格法是一种将二维或三维空间离散化的方法,可以将空间分成相等大小的小方格或小立方体,每个小格子或小立方体称为一个栅格。在电力巡检机器人路径规划问题中,栅格法可用于建立复杂障碍场地图。在栅格法中,能把面向存在障碍场特征的巡检地图,分解成若干个小栅格,各个栅格状态主要分为占用、空闲两类。将障碍物生成为一个占用栅格,然后将机器人所在位置也生成为一个占用栅格,空闲栅格则表示机器人可以自由通过的区域。采用栅格法建立复杂障碍场地图可以有效降低路径规划过程的难度,提高电力巡检机器人工作效率和安全性^[11]。

在本文研究内容中,把各个栅格信息,看做此栅格是否被障碍物占据的描述,如果此栅格中存在障碍物,那么此栅格概率值是 0,电力巡检机器人运行时,此栅格属于不可行驶状态;如果栅格不存在障碍物,此栅格便可通行^[12]。

设置巡检地图栅格边长是 M ,结合 M 把面向复杂障碍场的电力巡检环境,分解成若干矩形栅格,此时复杂障碍场的电力巡检环境中,原始巡检地图便转换为 s 行 b 列的栅格地图。巡检地图里各栅格均描述为一个节点,并具备对应序号编码^[13]。第 j 行第 i 列栅格序号是 $r(j, i)$:

$$r(j, i) = j + (i - 1) \times i \quad (1)$$

其中: $j \in [1, s]$, $i \in [1, b]$ 。

各个栅格权重表示为权重矩阵 $\bar{\omega}(n)$, $\bar{\omega}(n)$ 的数值代表栅格可通行概率。结合电力机器人巡检地图原始信息, 将栅格状态分成障碍类、可通行类^[14]。则 $\bar{\omega}(n)$ 的初始值是:

$$\bar{\omega}(n) = \begin{cases} 0, & \text{障碍类} \\ 1, & \text{可通行类} \end{cases} \quad (2)$$

$\bar{\omega}(n)$ 的数值, 表示巡检地图中某栅格和邻近栅格的相关性, 数值较大, 则相关性较大, 可通行概率较大。

结合栅格地图划分结果可知, 某节点最多存在 8 个方向。因此, 针对各个栅格而言, 它和附近栅格序号相关性可表示为矩阵 A 。将方向顺序以顺时针角度分别设为右上、右、右下、下、左下、左、左上、上^[15]。结合上文栅格序号编码, 便可构建矩阵 A :

$$A[-1, s-1, s, s+1, 1, -s+1, -s, -s-1] \quad (3)$$

则栅格 r 的临近栅格的序号 $cand(r)$ 是:

$$cand(r) = r + A \quad (4)$$

但针对电力机器人巡检地图边缘的栅格而言, 因某些栅格的方向, 会超出电力机器人巡检地图边界线, 使用式(4)运算便会出现误差。为此, 设置上、下边界栅格条件分别是 $\text{mod}(r, s) = 1$ 、 $\text{mod}(r, s) = 0$, mod 是求余函数。左、右边界栅格条件分别是 $1 \leq r \leq s$ 、 $(b-1) + 1 \leq r \leq s \times b$ 。若满足此类条件, 则栅格对应方向的栅格序号便设为 0, 此方向属于巡检机器人不可行驶位置。

1.2 基于局部动态融合的电力巡检机器人路径规划方法

电力巡检机器人路径规划问题, 可看做机器人在执行巡检任务时, 从出发点运行至目标点的安全巡检路径规划。在运行过程中, 除了已知障碍物之外, 经常会出现突发性障碍物, 此类障碍物不存在已知性, 且存在动态性, 若机器人不能躲避障碍物, 便会出现碰撞事件, 从而影响巡检进度^[16]。为此, 提出基于局部动态融合的电力巡检机器人路径规划方法, 此方法首先利用全局规划的方式, 结合已知障碍物信息, 规划一个全局性的安全运行路径。然后由局部动态路径规划方法, 以动态障碍物与机器人之间的距离作为路径改变决策信息, 完成局部路径规划, 并分析局部路径是否与全局路径方向一致, 完成巡检路径融合规划。

1.2.1 全局路径规划

电力巡检机器人的路径规划问题, 就是在 1.1 小节所构建复杂障碍场地图中, 对栅格 r 及临近栅格序号 $cand(r)$ 进行计算后, 选定出一个点集 $Q = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$, 此点集即为电力巡检机器人全局路径规划结果, r_1, r_2, \dots, r_m 是电力巡检机器人出发点与目标点之间, m 个路径栅格序号。 Q 属于复杂障碍场地图中电力巡检机器人巡检所用的最短路径点集^[17]。

设置出发点与目标点分别是 φ 、 ψ , 随机 2 个栅格之间距离, 就是 2 个栅格中心点之间连线长度, 将其设成 q :

$$q = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (5)$$

其中: x 、 y 表示栅格中心点横坐标、纵坐标。

在 Q 中, 首个栅格节点和最后一个栅格节点之间长度, 即为出发点与目标点之间全部可通行的路径长度最小值。为了在所构建复杂障碍场地图中检索 Q , 本文使用改进遗传算法, 结合复杂障碍场地图中已知静态障碍物所在栅格信息, 遍历寻优获取可安全运行的最短巡检路径。

本文将遗传算法改进, 引入删除算子, 则基于改进遗传算法的全局路径规划方法流程如下。

1) 可通行路径个体编码:

电力巡检机器人自出发点至目标点运行时, 安全运行的栅格路径即为路径个体, 将此个体排序串联的过程即为路径个体编码处理。将电力巡检机器人在巡检地图中的路径转化为一串编码, 这个编码可以分为两部分: 一个是表示路径方向的编码, 另一个是表示路径长度的编码。对于路径方向的编码, 可以将巡检地图中的每个栅格按照其位置关系编上号, 如将左上角的栅格编为 1, 右上角的栅格编为 2, 以此类推。然后将巡检路径上每个栅格的编码连接起来, 得到表示路径方向的编码。对于路径长度的编码, 可以将整个路径的长度进行均分, 将每个均分后的距离用二进制编码表示, 用一个符号表示正负, 表示路径长度的编码。这样, 整个路径编码就由路径方向编码和路径长度编码两部分组成了, 可以将其作为遗传算法中的一个个体, 进行计算和优化。

2) 初始化种群:

在电力巡检机器人路径规划中, 初始种群即为路径个体的集合。由于路径个体存在的栅格节点数量和路径长度存在差异, 因此在初始化种群的过程中, 必须限定路径栅格节点的数量。这个数量可以根据电力巡检机器人的巡检需求和机器人的运动能力进行设定。在生成路径个体时, 可以采取随机生成的方法或者遗传算法中的交叉变异策略生成^[18], 生成的路径个体需要保证在电力巡检机器人的巡检地图上合法的、安全的、可行的。在生成完路径个体集合后, 需要使用适应度函数对每个个体进行评价和排序, 然后进行选择、交叉和变异等操作, 生成下一代种群。通过多次迭代, 最终得到最优解, 即最优路径规划方案。

3) 适应度函数:

适应度函数对电力巡检机器人全局路径规划效果存在直接影响, 在本文研究内容中, 最短巡检路径需要存在连贯性, 为此, 适应度函数是:

$$fit(q) = \bar{\omega}_1 \cdot q_{\min} - \bar{\omega}_2 \cdot h_{\max} \quad (6)$$

其中: $\bar{\omega}_1$ 、 $\bar{\omega}_2$ 是最短巡检路径长度 q_{\min} 、最大连贯性函数 h_{\max} 的权重系数。

4) 遗传算子:

遗传处理过程的核心问题是设置合理的遗传算子^[19], 才能保证巡检路径不出现冗余路径。为此, 改进遗传算法使用删除算子处理冗余栅格点。具体算子详情如下:

(1) 选择算子

选择算子可在种群中提取优秀个体, 主要根据个体适应度筛选可通行的栅格路径个体。

(2) 交叉算子

引入两点交叉算子, 由此算子执行路径编码, 能够在 2 点交叉的操作下, 保证巡检路径连通性。

(3) 变异算子

电力巡检机器人运行过程中, 为保证寻优的路径栅格节点适应度始终最优, 需要使用变异算子执行变异, 如果变异算子数值随机设置, 便会导致巡检路径可靠性变差, 为此, 本文在适应度最显著的路径栅格点八邻域中, 随机选择可通行的栅格点, 运算此区域栅格点适应度, 把适应度最大栅格点作为通行路径。

(4) 删除算子

遍历全部路径个体, 结合路径个体之间的连通性, 分析是否存在冗余路径, 由删除算子去除冗余路径后, 运算可通行栅格节点适应度。

5) 分析迭代次数是否为最大值, 如果满足最大次数, 便可输出目前适应度函数最优路径个体, 将此路径个体最为电力巡检机器人全局路径规划结果。

1.2.2 局部动态路径规划

使用时间弹性带算法完成机器人局部动态路径规划, 时间弹性带算法是一种基于不同时刻机器人位姿信息结合距离阈值判断的路径规划算法^[20], 用于避免机器人与动态障碍物发生碰撞。该算法考虑了机器人、动态障碍物和全局规划路径之间的时态关系, 将全局规划路径实施弹性拉伸, 以实现避障运行。将全局规划路径分成若干段连通区域, 将区域中的每个点和动态障碍物进行距离判断, 判断是否有可能会出现碰撞, 确定每个区域的时间带大小, 以确保机器人在路径上进行运动时, 避开动态障碍物, 但又不会偏离全局规划路径, 对路径进行弹性拉伸, 使机器人在避开动态障碍物的同时, 能够在一定程度上保持运动的原始方向和速度。

设置电力巡检机器人为质点, 其偏转角是, 则:

$$\beta = \arctan\left(\frac{x_{\varphi} - x_{\psi}}{y_{\varphi} - y_{\psi}}\right) \quad (7)$$

其中: $(x_{\varphi}, y_{\varphi})$ 、 (x_{ψ}, y_{ψ}) 分别是电力巡检机器人巡检时出发点、目标点坐标。

局部动态路径规划时, 设置电力巡检机器人时刻的位姿坐标是 $B_t = [x_t, y_t, \beta_t]$, 则 $t+1$ 时刻位姿与 t 时刻的时间差是 Δt 。

局部动态路径规划的重点是躲避新增的、动态的未知障碍物。为此, 先结合各时刻电力巡检机器人激光雷达, 所检测的其和障碍物之间距离 e_t , 距离阈值 $e_0 = 0.5\text{m}$, 若电力巡检机器人和障碍物之间距离超过距离阈值, 机器人按照全局规划路径运行, 无需改变路径, 若小于距离阈值, 便需要改变路径, 此时路径改变方法是:

$$r' = \sum_0^{\delta} 1/e_t \times \beta(x_t, y_t) \quad (8)$$

其中: r' 、 δ 分别是路径改变后的栅格节点、复杂障碍物出现的动态障碍物数目。

巡检路径改变后, 巡检机器人运行轨迹也出现变化, 所以不可以按照原始线速度与角速度运行, 此时机器人线速度 V_x 、角速度 V_y 是:

$$V_x = \Delta t \left(\arctan \frac{x_{t+1} - x_t}{y_{t+1} - y_t} \right) 2\pi \quad (9)$$

$$V_y = \frac{\beta_{t+1} - \beta_t}{\Delta t} \quad (10)$$

1.2.3 面向复杂障碍场的巡检路径动态融合规划

实时检测局部动态规划路径下, 机器人运行方向是否与全局规划路径一致, 是为了确保机器人能够按照全局规划路径顺利到达目的地。若出现差异, 说明机器人遇到了一些障碍物或者运动出现了异常, 便需要运算出现差异时, 目前路径所在栅格节点邻域的所有可通行路径栅格节点, 与目前机器人位置节点的距离 e_a , 以及运算所有可通行路径节点与巡检目标点的距离 e_b , 将 e_a 与 e_b 相加, 提取数值最小路径节点作为下一步运行路径, 以此循环, 直到电力巡检机器人安全抵达目标点便可停止, 完成巡检机器人巡检路径动态融合规划。

在机器人运行过程中, 需要不断检测运动方向和全局规划路径是否一致, 并及时做出动态规划调整, 以确保机器人能够顺利到达目的地, 同时还需要考虑各种异常情况, 如突发的障碍物出现或者机器人运动出现异常等, 及时做出相应的调整, 保证电力巡检机器人的安全和巡检效率。

2 实验分析

为分析本文方法使用效果, 将某变电站作为本文方法的路径规划目标, 实验环境详情如表 1 所示。

表 1 实验环境详情

巡检环境参数类型	巡检环境特征
巡检环境	变电站
路况	巡检路面平整, 仅存在缓坡
光线	稳定
动态障碍物	工作人员
静态障碍物	墙壁、货架、自动化设备等

本文方法使用基于栅格法的复杂障碍场地图生成方法, 将此变电站巡检环境进行建模, 生成复杂障碍场地图, 详情如图 2 所示。

其中, 黑色与白色分别代表存在障碍物位置、可通行栅格位置。

表 2 是实验所用机器人的性能指标详情

参数类型	数值
机器人质量	36 kg
机器人尺寸	719 mm * 52 mm * 923 mm
续航时间	2.6 h
最大坡度	25°
云台水平调范围	[0°, 360°] 19°
云台垂直调节范围	[19° ~ 46°, 71°]

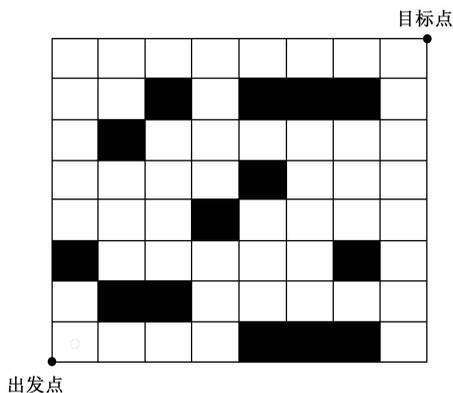


图 2 复杂障碍场地图

实验中的电力巡检机器人出厂性能参数、实验规划参数如表 3 所示。

表 3 机器人出厂性能参数、实验规划参数

参数类型	线速度最大值 /(m/s)	角速度最大值 /(rad/s)
出厂值	0.27	1.83
规划值	0.23	1.51

本文方法对此机器人全局规划路径如图 3 所示。

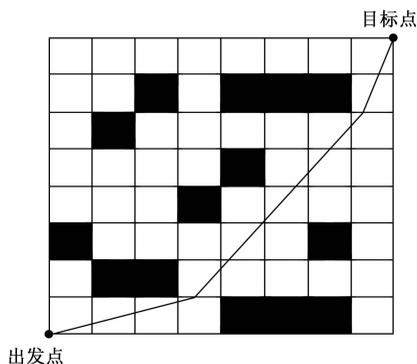


图 3 全局规划路径

在此障碍场中加入动态障碍物, 则本文算法结合图 3 的全局规划路径信息, 启动局部动态融合规划, 规划结果如图 4 所示。

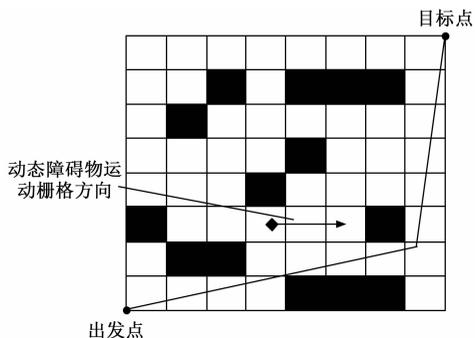


图 4 局部动态融合规划路径

化, 自适应规划巡检人的避障运行路径, 机器人未与多障碍物出现碰撞, 本文方法的局部动态融合规划效果较好。

图 5 是本文方法使用前, 巡检机器人巡检过程中避障耗时。

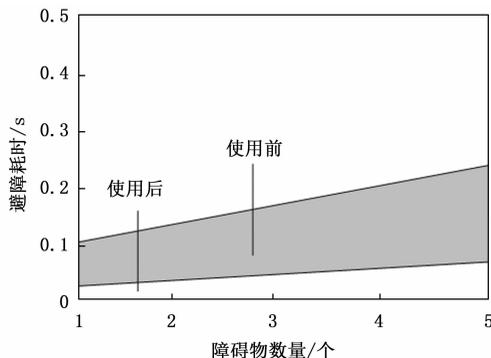


图 5 路径规划前后巡检机器人避障耗时变化

分析图 5 可知, 本文方法使用前, 巡检机器人安全完成巡检任务时, 避障耗时出现明显变化, 本文方法规划路径后, 巡检机器人避障耗时缩短, 可提高电力巡检机器人避障速度约 300%。

设置如表 4 所示多种复杂障碍场的巡检工况, 对比分析本文方法使用前, 电力巡检机器人路径规划长度、障碍物碰撞次数变化, 测试结果如表 5 所示。

表 4 多种复杂障碍场的巡检工况详情

工况编码	障碍物总数量/个	静态障碍物数量/个	动态障碍物数量/个
1	5	5	0
2	10	9	1
3	15	10	5
4	20	10	10

表 5 路径规划长度、障碍物碰撞次数对比结果

工况编码	使用前巡检路径长度/m	使用后巡检路径长度/m	使用前障碍物碰撞次数/次	使用后障碍物碰撞次数/次
1	38	35	1	0
2	40	36	2	0
3	45	40	4	0
4	50	44	7	0

分析表 5 对比结果可知, 本文方法使用前, 多种复杂障碍场的巡检工况中, 电力巡检机器人巡检路径长度均比本文方法规划路径长, 本文方法使用后, 巡检路径长度缩短值最高达 6m, 原因是本文方法能够将全局路径规划与局部动态路径规划相融应用, 减少机器人避障路径重复运行, 且在全局路径规划时, 引入删除算子改进了遗传算法, 有效删除巡检环境地图中冗余路径。障碍物碰撞次数分析可知, 本文方法所规划路径能够将碰撞次数控制为 0 次, 和使

(下转第 158 页)

如图 4 所示, 本文方法能够结合复杂障碍场的动态变